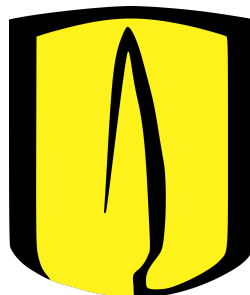

Medición de corriente en sistemas eléctricos mediante el uso del efecto GMR

Por

ALFREDO RICCI VÁSQUEZ

Asesor: GUSTAVO RAMOS, PH.D



Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Proyecto de grado entregado a la Universidad de los Andes
como parte de los requisitos para obtener el título de INGE-
NIERO ELÉCTRICO

BOGOTÁ, MAYO 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano,
por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A David Celeita, Juan Barbosa y David Guzman
por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

A mi asesor Gustavo Ramos,
por creer en una idea nueva y diferente.

A Stack Overflow,
por apoyar el libre conocimiento

RESUMEN EJECUTIVO

Objetivos

Objetivo principal

El efecto GMR se ha presentado como una alternativa de medición de corriente en sistemas eléctricos de gran viabilidad debido a su bajo costo, versatilidad y alta precisión. De este modo, el objetivo de este proyecto es mostrar como se puede utilizar el efecto GMR en medición de corriente para sistemas eléctricos.

Objetivos específicos

Para lograr el objetivo principal se plantean tres objetivos específicos. El primer objetivo consiste en construir un prototipo de medición de corriente el cual funcione mediante el uso del efecto GMR. El segundo objetivo consiste en crear un servidor de almacenamiento y procesamiento de datos mediante una Raspberry Pi. Finalmente, el tercer objetivo específico es diseñar e implementar una interfaz gráfica capaz de realizar un monitoreo en tiempo real de los datos adquiridos por el sensor.

Desarrollo

Para lograr los objetivos se inició por diseñar un circuito impreso, el cual contiene el sensor GMR, y realiza la medición de corriente a través del campo magnético que esta genera. El circuito tiene además una etapa de amplificación, que es necesaria debido a que el voltaje de salida del sensor ronda en el orden de los milivoltios. El diseño cuenta además con una fuente de corriente DC, usada para generar un nivel de campo magnético DC sobre un solenoide toroidal, debido a que el sensor GMR no distingue entre polarización de campo magnético. Finalmente, se usa un conversor análogo digital para poder adquirir la señal mediante un arduino, y a través de comunicación serial se guarda la información en la Raspberry Pi.

Siguiendo, mediante la aplicación Samba, y la librería pysmb de Python, se logró crear un servidor en la Raspberry Pi, en dónde por una parte, se envían datos cada segundo a la interfaz gráfica para ser mostrados al usuario y por otra parte, se almacenan los datos históricos en un

archivo para poder acceder a ellos posteriormente.

Por último, se crea una interfaz gráfica usando Python, la cual recibe los datos de la Raspberry Pi y los muestra y grafica segundo a segundo. La interfaz puede conectarse a diferentes dispositivos, mostrar gráficas de fasores, armónicos, factor de potencia y potencia activa y reactiva. Además la interfaz permite al usuario crear reportes sobre datos existentes o sobre datos nuevos.

Resultados

Se realizaron diferentes pruebas de forma exitosa mostrando no sólo la viabilidad del sensor GMR como medidor de corriente, sino la posibilidad de usar otras herramientas como complemento con el fin de crear un producto de gran utilidad. En la figura 1 se muestra la relación entre voltaje digital y corriente inyectada para un barrido de 40mA-400mA, en donde se obtuvo una incertidumbre porcentual promedio de 2,48%.

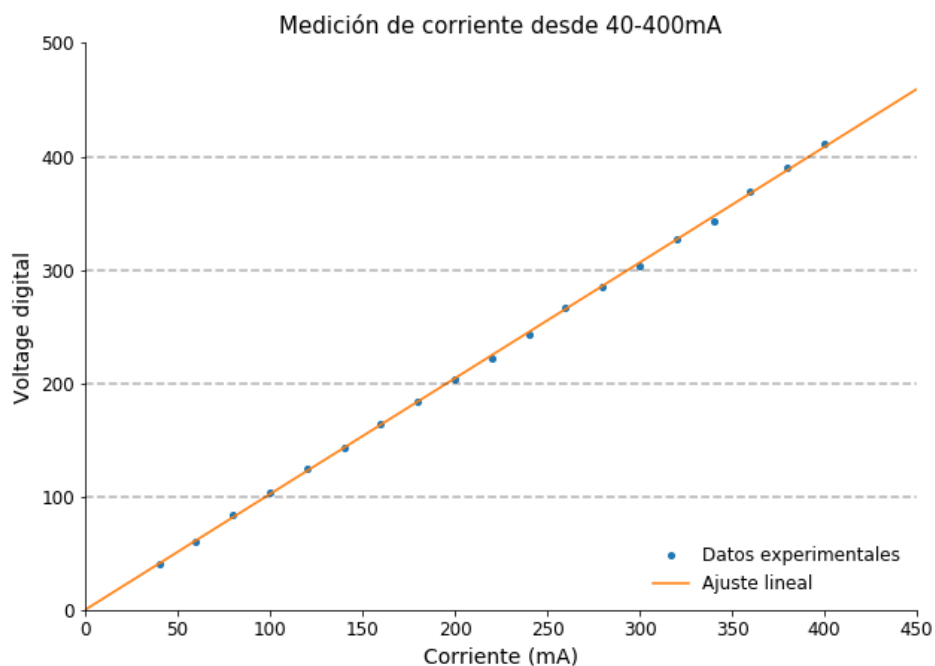


Figure 1: Datos de calibración entre 40mA y 400mA

Una de las posibles aplicaciones del medidor de corriente mediante el efecto GMR es la posibilidad de medir armónicos en la señal de corriente debido a la alta sensibilidad del mismo.

En la figura 2, se muestra el resultado de realizar una FFT a una señal triangular inyectada al medidor.

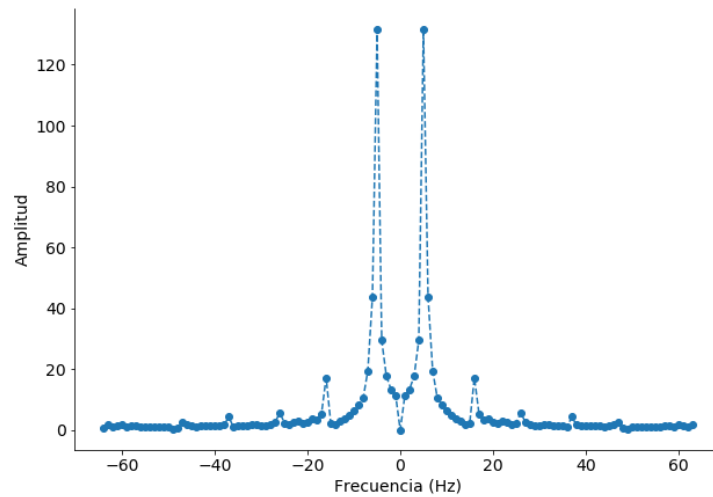


Figure 2: Espectro de la señal triangular medida por el sistema

De este modo no solo se cumplieron los objetivos planteados sino que además se abre la posibilidad a explorar más sobre el uso del efecto GMR para realizar mediciones en sistemas eléctricos.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	xi
1 Introducción	1
2 Marco teórico	3
2.1 Medición de potencia hasta el día de hoy	3
2.2 Medición de potencia mediante el efecto GMR	4
2.3 Importancia de la medición de armónicos	4
3 Objetivos específicos y metodología	5
3.1 Objetivos específicos	5
3.2 ¿Cómo lograrlo?	6
3.3 Restricciones y limitaciones	7
4 Desarrollo	9
4.1 Medición de corriente y adquisición de datos	9
4.1.1 Sensor de corriente mediante el efecto GMR	9
4.1.2 Generación de campo magnético DC, mediante estructura toroidal.	10
4.1.3 Amplificación de la señal y adquisición de datos	11
4.1.4 Montaje final	12
4.2 Creación de un servidor mediante el uso de una Raspberry Pi	13
4.2.1 Adquisición y procesamiento de datos	13
4.2.2 Uso de la Raspberry Pi como servidor	16
4.3 Diseño de interfaz gráfica	17
5 Resultados	21
5.1 Funcionamiento de la interfaz	22
5.2 Funcionamiento del servidor	23
5.3 Datos de calibración	23

TABLA DE CONTENIDOS

5.4	Inyección de señal triangular	25
5.5	Generación de armónicos	26
5.6	Costos	28
6	Conclusiones y perspectivas	29
	Referencias	31

LISTA DE TABLAS

2.1	Comparación métodos de medición de corriente actuales. Tabla tomada de la referencia [2]	3
5.1	Datos de calibración	24
5.2	Costos de los elementos	28

LISTA DE FIGURAS

1	Datos de calibración entre 40mA y 400mA	iv
2	Espectro de la señal triangular medida por el sistema	v
3.1	Diagrama mostrando las diferentes etapas del producto	6
4.1	Puente de Wheatstone usado para realizar la medición de campo magnético.	10
4.2	Relación entre entrada y salida del sensor, para una alimentación de 5V. Se observa que el sensor no distingue entre la polaridad del campo magnético. [5]	11
4.3	Diseño del solenoide toroidal para generar el campo magnético DC.	11
4.4	Diseño de caminos del circuito impreso	12
4.5	Dimensiones y componentes del circuito impreso	12
4.6	Diseño de las piezas para ser realizadas en corte láser.	13
4.7	Diagrama de flujo de adquisición de datos	14
4.8	Dialogo con datos de conexión	18
4.9	Diálogo de adquisición de datos históricos	19
4.10	Diálogo de adquisición de datos nuevos	19
5.1	Imagen del montaje completo con el cual se realizaron las pruebas	21
5.2	Interfaz gráfica completa	22
5.3	Funcionamiento de las gráficas de potencia y factor de potencia	22
5.4	Datos de calibración entre 40mA y 400mA	24
5.5	Señal triangular medida por el sistema	25
5.6	Espectro de la señal triangular medida por el sistema	25
5.7	Armónicos de una señal sinusoidal	26
5.8	Armónicos de una señal sierra	27
5.9	Armónicos de una señal cuadrada	27

INTRODUCCIÓN

"Invention is the most important product of man's creative brain. The ultimate purpose is the complete mastery of mind over the material world, the harnessing of human nature to human needs."

— Nikola Tesla

En los sistemas eléctricos se ha vuelto cada vez más importante poder realizar mediciones con una mayor precisión y menor costo. Esto se debe a que cada vez son más las diferentes aplicaciones que hay a la medición de potencia en los sistemas. Por ejemplo en el área de sistemas protecciones en líneas de transmisión una mala medición de voltaje o corriente pueden llegar a significar costos altísimos para la empresa encargada de la transmisión, haciendo que no sólo sea importante realizar las medidas de forma precisa sino que también de forma oportuna. En los sistemas de control también es importante tener mediciones en tiempos cortos y de forma muy precisa, para así poder garantizar una mejor respuesta de los sistemas. O por ejemplo para los comercializadores, poder tener información en tiempo real del consumo de los diferentes usuarios se ha vuelto cada vez una opción más atractiva.

Ahora bien, en los sistemas de potencia las mediciones más importantes son la corriente y el voltaje. Hoy en día existen diversos métodos para realizar mediciones de estos, los cuales se pueden clasificar según su costo, versatilidad, rango de operación, sensibilidad, entre otros. Por ejemplo el transformador de potencial (VT) y el transformador de corriente (CT) que son quizás unos de los métodos más tradicionales, tienen desventajas como que sólo funcionan en sistemas AC o que al usar núcleo de materiales ferromagnéticos, están sujetos a la histéresis de éste. Por otro lado el transformador óptico de corriente surge como una alternativa reciente a

la medición de corriente, pero tiene la desventaja de ser altamente costoso.

Dentro de las últimas alternativas para realizar la medición de corriente se encuentra el efecto de *magnetorresistencia gigante* (GMR). Este es un efecto magneto-cuántico, en el cual el material disminuye su resistencia de forma bastante notoria bajo la aplicación de campos magnéticos externos [1]. De este modo, similar a los sensores de corriente por *efecto Hall*, se vuelve posible medir la corriente que pasa a través de una línea sin necesidad de abrir el circuito, a través de la medición del campo magnético generado por la corriente en dicho circuito.

Si bien el efecto GMR tiene ya 30 años de ser descubierto, su uso para medir corriente en sistemas eléctricos se encuentra en estado del arte. El efecto GMR usado para medir corriente en sistemas eléctricos presenta numerosas ventajas frente a los otros métodos de medición existentes. Por ejemplo, los sensores GMR funcionan para medir sistemas tanto AC como DC, tienen un rango de operación en corriente que va desde los miliamperios hasta los kiloamperios y en frecuencia que va hasta los MHz, presentándose como una alternativa altamente versátil. Además en comparación al los demás métodos de medición, es bastante sensible y preciso. Finalmente, es una alternativa de muy bajo costo.

Por estas razones, el objetivo de este proyecto es **mostrar como se puede usar el efecto GMR para realizar medidas de alta precisión y bajo costo en sistemas eléctricos**. Para lograr esto, se propone construir un prototipo de medición mediante dicho efecto, el cual debe ser capaz de realizar mediciones de corriente en tiempo real, almacenarlas en un servidor y mostrarlas en una interfaz gráfica. Este proyecto se realizó basándose en un modelo de medición GMR presentado en la referencia [2].

MARCO TEÓRICO

2.1 Medición de potencia hasta el día de hoy

Para entender la motivación detrás del desarrollo de técnicas como el efecto GMR para medición de corriente es importante empezar por distinguir las diferentes alternativas existentes hasta el momento. En la tabla 2.1 se resumen las principales formas de medición de corriente actuales, comparándolas por aspectos como costo, sensibilidad o rango de operación, entre otros.

Tipo	CT	Rogowski	Shunt	Optico	Efecto Hall	GMR
Precio	Alto	Bajo	Bajo	Muy alto	Medio	Bajo
Frecuencias	0.05-10KHz	0.1-100MHz	kHz-MHz	300MHz	1MHz	5MHz
Medición DC	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Sensibilidad	1V/A	10mV/A	1mV/A	Alta	10Oe	0.01Oe
Corriente	1A-100kA	0.1-100kA	mA-kA	1A-3kA	10mA-35kA	1mA-10kA

Table 2.1: Comparación métodos de medición de corriente actuales. Tabla tomada de la referencia [2]

De este modo, sobre las alternativas existentes es posible evidenciar que la medición de corriente usando el efecto GMR presenta la mejor relación entre versatilidad, costo y sensibilidad. Ahora bien, actualmente la literatura respecto al uso del efecto GMR en sistemas de potencia es muy reducida, debido a su reciente aparición. Esto abre las puertas a la investigación sobre el mismo.

2.2 Medición de potencia mediante el efecto GMR

Un común denominador dentro de una gran parte de los métodos de medición de corriente, es que ésta se mide indirectamente mediante la medición de un campo magnético. Este campo magnético puede ser producido por una fuente AC, mediante la inducción de Faraday, o DC mediante la ley de Ampere. De este modo, uno de los efectos de respuesta al campo magnético es el efecto GMR. Este es un efecto mecánico-cuántico, en dónde se varía la resistencia de un material al aplicar un campo magnético. Dichos materiales están compuestos de láminas delgadas intercaladas de diferentes aleaciones de materiales ferromagnéticos, con metales diamagnéticos [1].

Ahora bien, la relación entre campo magnético y corriente para una línea está dado por la ley de Ampere para campos eléctricos estacionarios

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}, \quad (2.1)$$

en dónde \vec{J} es la densidad de corriente y \vec{B} es el vector campo magnético [3]. De éste modo, la corriente sobre la línea genera un campo magnético rotacional alrededor de la misma, el cual es inversamente proporcional a la distancia de la línea.

2.3 Importancia de la medición de armónicos

Dada la alta sensibilidad, uno de los posibles usos que se le puede dar al sensor es la medición de armónicos en la corriente. La medición de armónicos puede ser de interés debido a que la potencia activa está definida como,

$$S = |V||I| \cos \phi, \quad (2.2)$$

en donde $\cos \phi$ es el factor de potencia [4]. Si ahora la corriente no solo está compuesta por una señal sinusoidal sino que tiene armónicos, esta puede ser descrita por una serie de Fourier de la forma,

$$I = \sum a_n e^{i2\pi f t}, \quad (2.3)$$

de modo que la amplitud de corriente ahora estaría dada por,

$$|I|^2 = \sum a_n^2, \quad (2.4)$$

haciendo que realizar la medición de los armónicos de la corriente puede proveer una medida mucho más precisa sobre la potencia consumida por el sistema, ya que normalmente únicamente se tiene en cuenta el valor de a_0 para encontrar la potencia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los objetivos específicos para poder cumplir el objetivo general, así como la metodología para lograrlo. Además se habla acerca de las limitaciones y restricciones del proyecto.

3.1 Objetivos específicos

Para poder lograr el objetivo principal del proyecto, se plantean tres objetivos específicos:

- **Diseñar y construir un prototipo de medición de corriente usando un sensor GMR:** El primer objetivo específico, y quizás el eje central de este proyecto es la construcción de un prototipo el cual tenga de entrada una señal de corriente, ya sea AC o DC y la salida sea una señal de voltaje digital proporcional a dicha corriente.
- **Crear un servidor de almacenamiento y comunicación de datos:** Trabajar con sistemas digitales proporciona grandes ventajas a nivel de procesamiento y comunicación. En este caso, al tener una señal ya digitalizada, es posible procesar y almacenar esta en un servidor, para posteriormente poder ser enviada a diferentes clientes. En este proyecto se realiza el procesamiento y almacenamiento en una *Raspberry Pi*.
- **Creación de una interfaz gráfica para el monitoreo en tiempo real de los datos:** Otra de las ventajas de trabajar con sistemas digitales, es la facilidad que estos proveen para realizar monitoreos en tiempo real de los sistemas. En este caso, se plantea realizar una interfaz gráfica que permita al usuario obtener los valores medidos por el sensor en tiempo real.

3.2 ¿Cómo lograrlo?

Para lograr el objetivo es necesario primero desglosar cada uno de los objetivos específicos. El desglose completo de las diferentes etapas del proyecto se muestra en la figura 3.1. Del sistema eléctrico de interés se pueden hacer mediciones de corriente y voltaje. La corriente a su vez genera un campo magnético proporcional a la misma. El sensor GMR traduce este campo magnético en un voltaje del orden de mV. Posteriormente mediante un amplificador operacional de instrumentación se puede amplificar esta señal, para luego ser convertida en una señal digital mediante un conversor análogo-digital. Una vez se tiene la señal digital se aplica un procesamiento de señales a esta, y se almacenan los datos procesados en un servidor, el cual se comunica con la interfaz gráfica. Se explica el uso campo magnético DC en el siguiente capítulo. La medición de voltaje no entra dentro de los límites del proyecto.

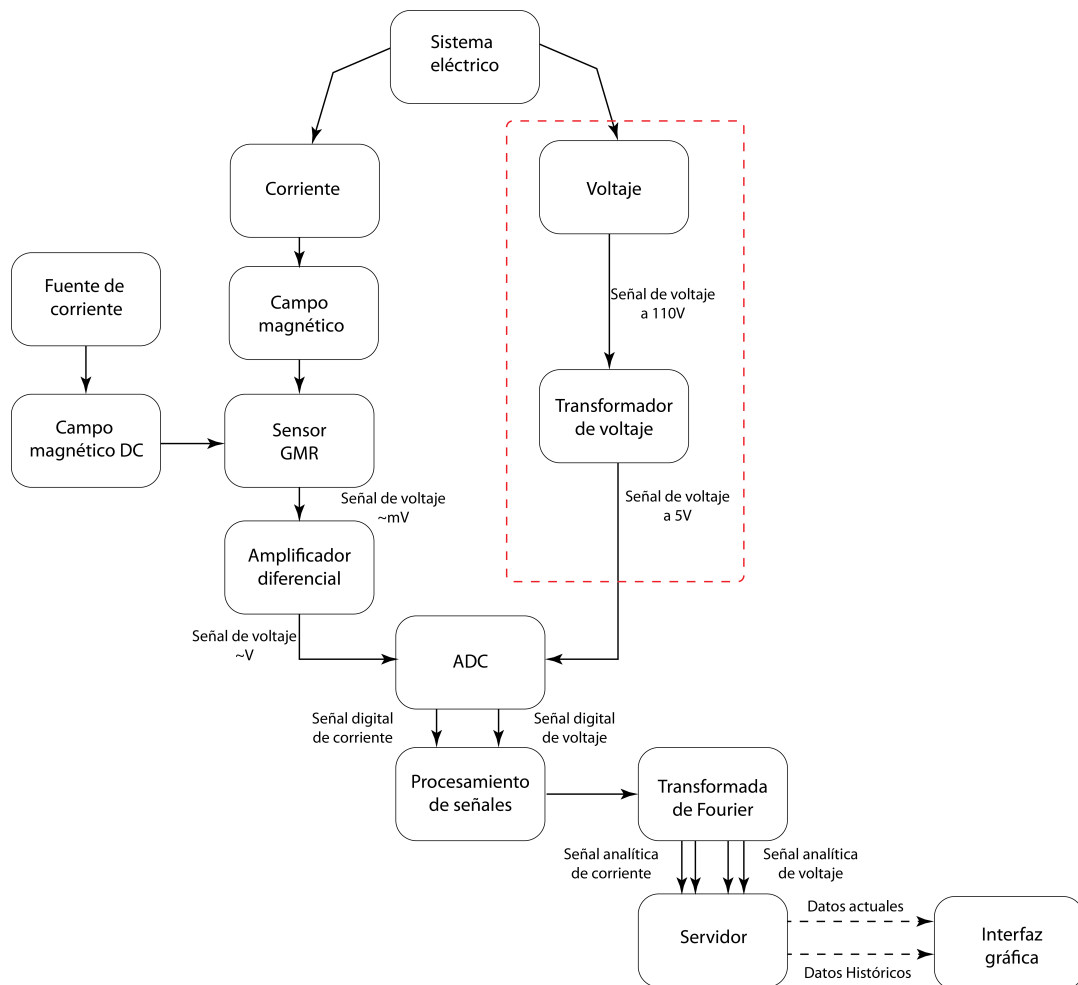


Figure 3.1: Diagrama mostrando las diferentes etapas del producto

3.3 Restricciones y limitaciones

Además para lograr el objetivo es necesario tener claro las restricciones del problema. Las restricciones son:

- **Rango de medición en corriente:** El rango sobre el cual se puede medir la corriente depende de un único factor: el sensor GMR. Una de las principales desventajas de realizar mediciones con sensores GMR es que estos tienen un punto de saturación en el cual dejan de comportarse de forma lineal. Para el sensor elegido se espera poder realizar mediciones de hasta 10A sin entrar en región de saturación. De este modo el rango de medición de corriente iría desde el orden de 10mA hasta 10A. Por debajo de los 10mA se espera que el ruido electrónico empiece a generar una incertidumbre muy alta en la medida.
- **Rango de medición en frecuencia:** A la hora de encontrar el rango de frecuencias sobre el cual se puede trabajar hay varios factores que tener en cuenta. En primer lugar se encuentra el rango de frecuencias del sensor. Éste va desde valores DC hasta el rango de MHz. En segundo lugar se encuentra el rango de operación del amplificador de instrumentación, el cual también funciona de forma óptima hasta el orden de los MHz. Finalmente se encuentra la parte de adquisición de datos. Está será la que delimitará el problema. Por un lado el ADC es capaz de muestrear a una velocidad de hasta 860 muestras por segundo. El problema está en que el tiempo de comunicación entre el ADC el arduino y la Raspberry Pi es de unos 3 milisegundos haciendo que la tasa de muestreo efectiva sin perder datos sea de 128 muestras por segundo. Por esta razón se decide operar únicamente a una frecuencia constante de 5Hz.
- **Medición únicamente de corriente:** Si bien para poder realizar medición de potencia es necesario medir la corriente y el voltaje, este proyecto gira entorno al uso del efecto GMR el cual se usa para medir corriente. De este modo se realizarán únicamente mediciones de corriente, aunque tanto el servidor como la interfaz quedan completamente listos para manejar las mediciones de voltaje, de modo que extender el proyecto sea sencillo.
- **Estado estacionario:** El procesamiento se va a realizar en bloques de a 128 muestras. Es decir que cada segundo se procesa un nuevo bloque. Si la señal es de 5Hz, se espera que cada bloque tenga 5 ciclos, haciendo que no sea posible obtener la información de estado transitorios. De este modo se asume que el sistema va a estar en estado estacionario.
- **Factores externos constantes:** Finalmente se asume que los factores externos varían muy escasamente. Por ejemplo el sensor es sensible a cambios de temperatura, pero se asume que la temperatura va a mantenerse constante.

DESARROLLO

Dentro de éste capítulo se discutirán las principales herramientas usadas para la construcción de las tres etapas del proyecto. La primera etapa consiste en la *medición y adquisición de datos* de corriente mediante el sensor de efecto GMR, un amplificador operacional de instrumentación, un conversor análogo-digital (ADC) y un Arduino UNO. Posteriormente estos datos son leídos de forma serial por una Raspberry Pi, la cual realiza un procesamiento de los datos y los almacena, haciendo la función de servidor. Finalmente, los datos son enviados mediante un protocolo TCP a una *interfaz gráfica* construida en Python, que se puede operar desde cualquier computador, y sirve para hacer un seguimiento en tiempo real de los datos.

4.1 Medición de corriente y adquisición de datos

4.1.1 Sensor de corriente mediante el efecto GMR

La medición de corriente se realiza mediante el sensor de efecto GMR AA002-02E de NVE [5]. Este sensor consiste de un puente de Wheatstone, en el cual dos de las resistencias son resistencias GMR, y las otras dos son resistencias de $5k\Omega$, como se observa en la figura 4.1. Las resistencias GMR varían su resistividad de forma proporcional al campo magnético, el cual a su vez es proporcional a la corriente sobre la línea.

La relación entre el voltaje de salida del sensor y las resistencias GMR está aproximadamente dada por:

$$V_{\text{out}} = \frac{\Delta R}{R}(V_+ - V_-) \quad (4.1)$$

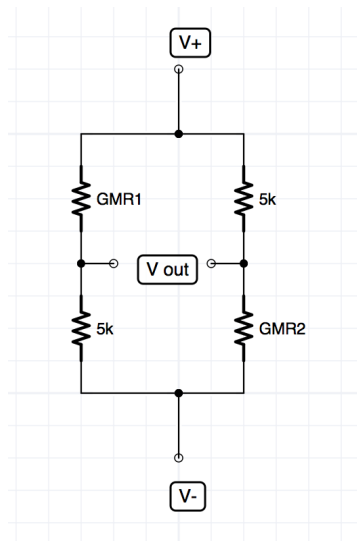


Figure 4.1: Puente de Wheatstone usado para realizar la medición de campo magnético.

en donde R corresponde a las resistencias de $5k\Omega$, y ΔR corresponde al cambio de la resistencia en las resistencias GMR debido al cambio en el campo magnético [2]. Dado que el campo magnético es proporcional a la corriente, y el cambio en la resistencia es proporcional al campo magnético, el voltaje de salida del sensor va a ser directamente proporcional a la corriente sobre la línea.

4.1.2 Generación de campo magnético DC, mediante estructura toroidal.

El efecto GMR tiene la propiedad de variar la resistividad del material, de forma proporcional a la *magnitud del campo magnético*. Por esta razón el sensor no es capaz de distinguir la dirección del campo magnético, haciendo que solo sea posible medir la magnitud de la corriente, más no su dirección. Por esto para poder realizar medición de corrientes AC, es necesario añadir un campo magnético DC al sensor, de modo que ahora el campo magnético AC oscilaría sobre un nivel DC y no se perdería la información de corriente negativa. El nivel DC se remueve posteriormente usando procesamiento de señales, recuperando así la señal original. La gráfica de entrada contra salida del sensor, tomada de la hoja de datos del sensor se muestra en la figura 4.2

Para poder generar el campo magnético DC, se usa un *solenoides toroidal*, con las dimensiones mostradas en la figura 4.3. El embobinado cuenta con aproximadamente 400 espiras, lo cual genera un campo magnético DC suficiente para poder recuperar la señal AC completamente. Se construye una fuente de corriente utilizando un amplificador operacional *Ti OPA552* [?], la cual alimenta el embobinado del solenoide. Mediante un potenciómetro es posible variar fácilmente la corriente, y el campo magnético producido por el solenoide. El núcleo del solenoide está hecho de ferrita, la cual tiene un bajo costo, y una permeabilidad magnética relativa (μ_r) bastante alta. Este núcleo además ayuda a incrementar el campo magnético del sensor y disminuye la

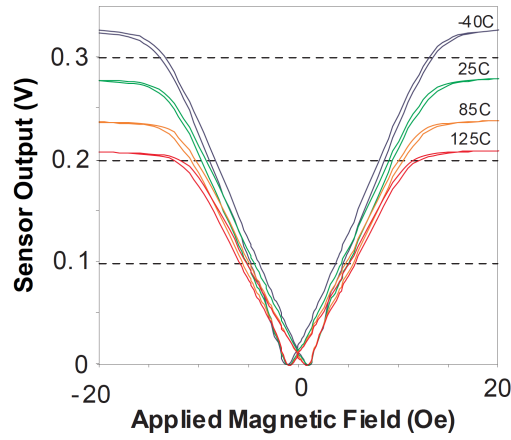


Figure 4.2: Relación entre entrada y salida del sensor, para una alimentación de 5V. Se observa que el sensor no distingue entre la polaridad del campo magnético. [5]

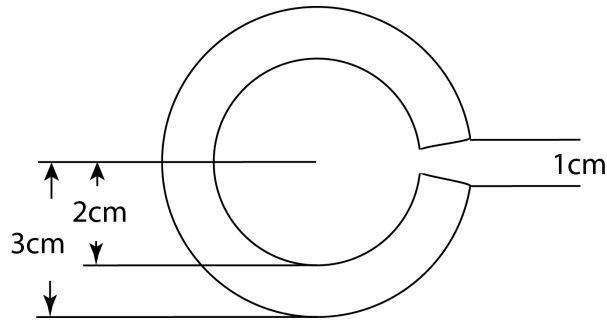


Figure 4.3: Diseño del solenoide toroidal para generar el campo magnético DC.

interferencia de campos magnéticos externos [2]. Con este montaje el campo magnético sobre el sensor está aproximadamente dado por:

$$B \approx \frac{\mu_0 I}{d} \quad (4.2)$$

en donde I es la corriente que se desea medir y d es la separación mostrada en 4.3.

4.1.3 Amplificación de la señal y adquisición de datos

El sensor usado tiene una sensibilidad de entre 3.2 y 4 mV/V/Oe, la cual varía dependiendo de la temperatura. Esto quiere decir que, usando la relación mostrada en 4.2, y una alimentación de 10V en el sensor, se tiene una salida de 34mV/A. Por esta razón es necesario usar un amplificador de instrumentación, el cual disminuye el ruido y aumenta la señal de salida según la ganancia. En este caso se usó el amplificador *INA114* [7]. La ganancia del amplificador está dada por,

$$G = 1 + \frac{50K\Omega}{R_g}, \quad (4.3)$$

en donde R_g la resistencia variable que se observa en la figura 4.4 En el montaje se usa un potenciómetro para poder tener una ganancia variable.

Una vez amplificada la señal, se realiza el proceso de conversión análogo-digital, mediante el ADC *ADS1115* de Adafruit [8]. Este ADC tiene una resolución de 16 bits. Posteriormente se conecta el ADC a un Arduino UNO, el cual se encarga de realizar el muestreo a una frecuencia de 128 muestras por segundo. Inicialmente se planteó el uso de la Raspberry Pi directamente para realizar la adquisición de datos digitalizados, pero debido a que esta corre sobre un sistema operativo, los intervalos de muestreo no eran constantes y la tasa de muestreo no era la deseada.

4.1.4 Montaje final

Para realizar el montaje, se realiza un circuito impreso, el cual contiene el sensor, la fuente de corriente para alimentar el solenoide, el amplificador de instrumentación, y el espacio para conectar el ADC. El diseño del circuito impreso se muestra en las figuras 4.4 y 4.5.

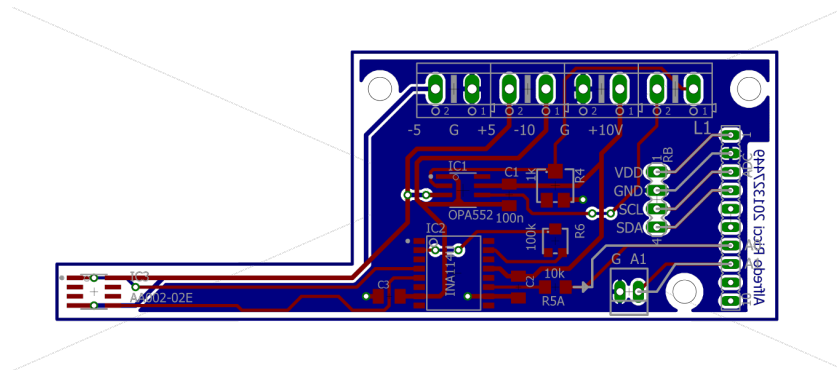


Figure 4.4: Diseño de caminos del circuito impreso

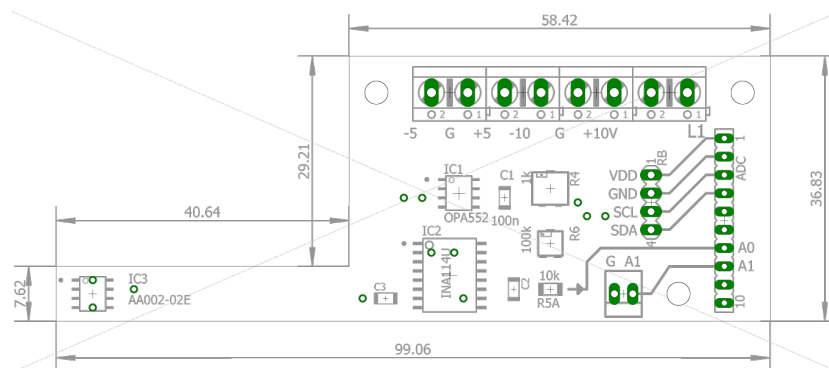


Figure 4.5: Dimensiones y componentes del circuito impreso

Dado que el sensor mide el campo magnético, y éste puede variar fuertemente dependiendo de la distancia o la orientación del sensor, es necesario diseñar una base que coloque todos los elementos en su respectivo lugar. Esta se diseña para ser cortada en acrílico mediante corte láser, y ser ensamblada posteriormente. Las diferentes piezas correspondientes al ensamble se muestran en la figura 4.6.

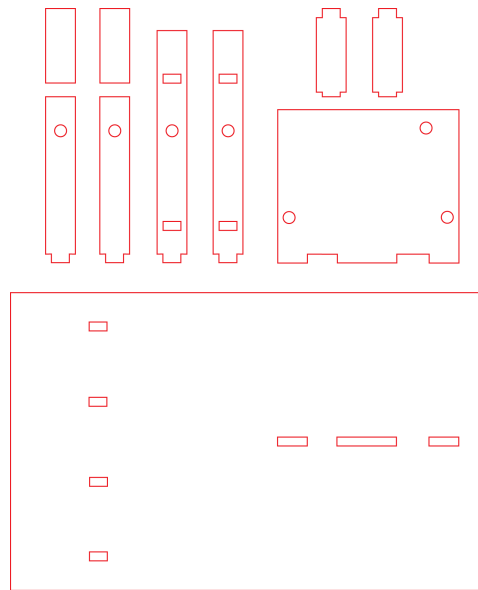


Figure 4.6: Diseño de las piezas para ser realizadas en corte láser.

4.2 Creación de un servidor mediante el uso de una Raspberry Pi

Una de las principales ventajas de trabajar con una Raspberry Pi es su bajo costo y alta versatilidad. En este caso, la Raspberry Pi se va a usar para dos finalidades. La primera es adquirir los datos seriales producidos por el Arduino y procesarlos. La segunda es usarla como servidor para poder acceder remotamente a los datos adquiridos.

4.2.1 Adquisición y procesamiento de datos

Dado que existen sistemas operativos de la Raspberry Pi que corren sobre Linux, es posible crear programas en lenguajes de programación convencionales como C/C++ o Python ejecutables desde ésta. De este modo, se crea un programa en Python encargado de realizar la adquisición de datos de forma serial, usando la librería `serial.Serial` de la siguiente forma:

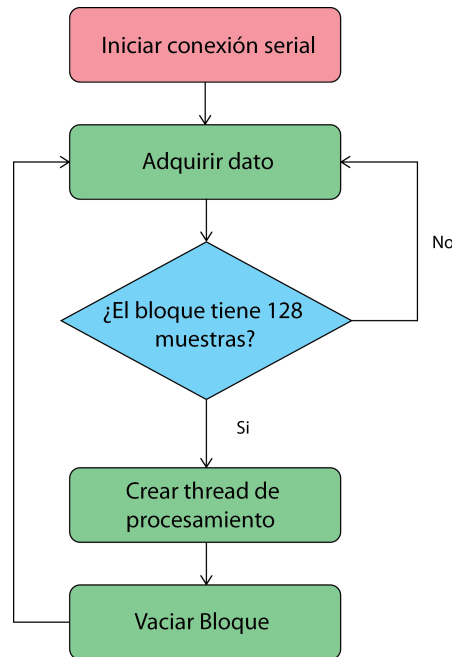


Figure 4.7: Diagrama de flujo de adquisición de datos

```

1 conexion=serial.Serial("/dev/ttyACM0", 115200)

```

en donde, "/dev/ttyACM0" es el puerto serial usado, y 115200 el baudrate. Una vez creada la instancia de tipo serial se pueden hacer lecturas seriales usando el comando `conexion.read()`. Esta lectura se hace hasta completar bloques de 128 datos, correspondientes a 1 segundo. Una vez se tiene completo un bloque de datos, se crea una instancia de tipo Thread, la cual se encarga de procesar los datos de forma paralela mientras se siguen tomando datos. El diagrama de flujo de dicho proceso se puede observar en la figura 4.7.

El procesamiento de datos consiste en obtener la magnitud y fase del armónico fundamental del bloque a procesar, y la magnitud de los siguientes 5 armónicos. Este proceso se realiza primero, eliminando el nivel DC del bloque y posteriormente realizando una *transformada discreta de Fourier* (DFT) sobre este. La DFT está definida como,

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n [\cos(2\pi kn/N) - i \sin(2\pi kn/N)], \quad (4.4)$$

donde X_k es la señal en el espacio de frecuencia, x_n es la señal en el tiempo y $N = 128$ es la longitud del bloque. Dado que sólo se desea hallar la amplitud de los primeros 6 armónicos, se reemplaza $k = 1, 2, \dots, 6$ y se obtiene así un vector X de seis posiciones. La ecuación 4.4, podría escribirse como,

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n [\cos(2\pi kn/N)] - i \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n [\sin(2\pi kn/N)], \quad (4.5)$$

si se define el vector $c_k = \cos(2\pi kn/N)$ como el k-esimo vector de coseno y $s_k = \sin(2\pi kn/N)$ como el k-esimo vector seno y x como el vector de datos, la ecuación 4.7 podría ahora escribirse como,

$$X_k = \frac{1}{N} x \cdot c_k - i \frac{1}{N} x \cdot s_k, \quad (4.6)$$

o para que sea más eficiente computacionalmente,

$$X_k = \overline{x \odot c_k} - i \overline{x \odot s_k}, \quad (4.7)$$

en donde $a \odot b$ representa el producto elemento a elemento entre vectores. De este modo, bastaría con hallar el promedio del producto elemento a elemento, entre los vectores seno y coseno para encontrar los diferentes valores de la transformada de Fourier para las frecuencias múltiplos de la fundamental. El código necesario para realizar este proceso se muestra a continuación:

```

1 #Funcion que devuelve un n mero complejo correspondiente al fasor pra la
  refuencia dada
2 def analytic_signal(x,f,n):
3
4     parte_real=x*np.sin(2*np.pi*f*n*t)
5     parte_imaginaria=x*np.cos(2*np.pi*f*n*t)
6     parte_real=np.mean(parte_real)
7     parte_imaginaria=np.mean(parte_imaginaria)
8
9     return(2*parte_real+2j*parte_imaginaria)
10
11 def procesar_bloque():
12
13     data=bloque_procesar
14     #eliminar nivel DC
15     data=data-np.mean(data)
16     data=data*relacion
17     #Archivo con el ultimo dato
18     with open(' /home/pi/shared/ultimo_dato.txt','w') as f:
19         voltaje=1
20         f.write(str(datetime.now())+',')
21         f.write(str(voltaje)+' ,')
22         angulo_corriente1=abs(np.angle(analytic_signal(data,5,1)))

```

```

23         f.write(str(angulo_corriente1)+' ')
24
25         #Guardar armónicos
26         for i in range(1,6):
27
28             print(i)
29             f.write(str(abs(analytic_signal(data,5,n=i)))+ ' ')
30
31         #actualizar archivo historico
32         with open('/home/pi/shared/ultimo_dato.txt','r') as file1:
33             with open('historico.txt','a') as file2:
34                 file2.write(file1.readline()+'\n')

```

Así, de cada bloque procesado, se obtendrían 7 valores, 6 correspondientes a amplitudes de la corriente con sus armónicos, y uno de la fase del armónico fundamental.

4.2.2 Uso de la Raspberry Pi como servidor

Una vez se tienen los 7 valores de cada bloque procesado, se procede a almacenar estos valores en dos archivos de texto. El primero consiste en un archivo que únicamente almacena el último valor procesado. Esto quiere decir que en cada ciclo se sobrescribe. Este será el archivo que usará la interfaz posteriormente. El segundo archivo es un archivo histórico el cual no se sobrescribe, sino que se le añaden los datos del último bloque procesado en la última fila. Esto se realiza con el fin de poder acceder a dichos datos posteriormente. Para el archivo del último dato se usa el comando `f=open("ultimo_dato.txt", "w")`, donde el parámetro "w" indica que el archivo se va a sobrescribir, mientras que para el archivo histórico se usa el comando, `f=open("historico.txt", "a")`, donde el parámetro "a", indica que se va a agregar el dato en la última fila. Para poder escribir el dato en el archivo, se usa el comando `f.write()`.

Para poder acceder a estos archivos remotamente, se debe instalar el programa *Samba* en la Raspberry Pi, y se debe crear una carpeta compartida en la cual quedan almacenados los archivos. De este modo la Raspberry Pi quedaría funcionando ahora como un servidor al cual se puede acceder remotamente. Los datos quedan almacenados con la siguiente estructura: Fecha, Voltaje, Factor de potencia, Corriente fundamental, Armónico 1, Armónico 2, Armónico 3, Armónico 4, Armónico 5. Así, un fragmento del archivo de texto histórico se vería de la siguiente forma,

```

1 2018-05-14 00:11:25.29,111.095,5.99,0.19,10.07,2.02,2.53,1.61
2 2018-05-14 00:11:26.29,110.809,5.59,0.10,10.33,2.98,2.73,1.42

```

3	2018-05-14 00:11:27.29,111.678,5.28,0.10,10.10,2.06,2.56,1.28
---	---------------------------------------------------------------

en donde cada línea está separada por 1 segundo de la siguiente línea.

4.3 Diseño de interfaz gráfica

Uno de los objetivos del proyecto es poder crear una forma de monitoreo remota de la potencia. Para esto es necesario entonces, crear una interfaz gráfica que se puede correr desde cualquier computador. Hasta ahora, los requerimientos funcionales de dicha interfaz son los siguientes:

- **Mostrar valores:** Se deben mostrar los valores de voltaje, corriente, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente en tiempo real.
- **Generar reporte:** Se debe poder generar dos tipos de reporte. El primer tipo de reporte se construye sobre datos existentes, almacenados en el archivo histórico. El segundo tipo de reporte se construye a partir de datos nuevos.
- **Conectar dispositivo:** La interfaz debe permitir al usuario poder conectarse al dispositivo sobre el cual se están tomando los datos.
- **Iniciar adquisición** Una vez conectado a un dispositivo, se debe poder iniciar la adquisición de los datos, de modo que empiecen a mostrarse en la interfaz.
- **Gráfica de potencia en tiempo real** La interfaz debe mostrar tanto la potencia activa como reactiva y su histórico en tiempo real en una gráfica.
- **Gráfica de factor de potencia en tiempo real:** Se debe poder mostrar el factor de potencia y su histórico en una gráfica.
- **Gráfica del fasor de potencia en tiempo real:** Se debe poder mostrar el fasor de potencia en una gráfica polar en tiempo real.
- **Gráfica de armónicos:** Finalmente, la interfaz debe mostrar de forma gráfica los armónicos en tiempo real.

Para poder cumplir estos requerimientos, la interfaz debe acceder a la carpeta compartida de la Raspberry Pi, en donde se almacenan tanto el último dato, como el archivo histórico. Una vez en la carpeta debe generar una copia temporal del archivo histórico en el computador, leer dicho archivo y realizar las operaciones necesarias para mostrar y graficar los valores. Para crear la conexión con la carpeta compartida, se usa la librería pysmb de Python. Esta librería sirve para enviar y recibir datos mediante el protocolo TCP. Para poder crear la conexión con la carpeta compartida se usa el siguiente código:

```
1 self.conn = SMBConnection(self.userID,
2                             self.password,
3                             self.client_machine_name,
4                             self.server_name,
5                             use_ntlm_v2=True,
6                             is_direct_tcp=True)
7
8 self.conn.connect(self.server_ip, 139)
```

Los parámetros `userID`, `password`, `server_ip`, `server_name`, deben ser suministrados por el usuario. Por esta razón se crea una ventana de diálogo como la mostrada en la figura 4.8, en la cual el usuario puede introducir los datos de conexión.

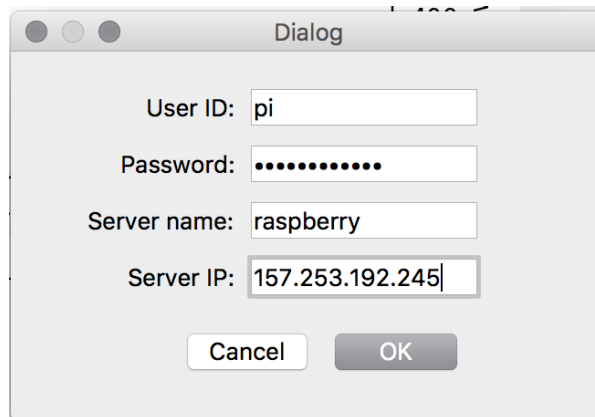


Figure 4.8: Dialogo con datos de conexión

Una vez creada la conexión, es posible pedirle al atributo `conn` que genere un duplicado del archivo con el último dato en el computador que se está usando mediante el siguiente código:

```
1 with open('ultimo.txt', 'w') as dataFile:
2
3     self.conn.retrieveFile('pishare', '/ultimo_dato.txt', dataFile)
4
5 self.ultimo_dato=np.genfromtxt('ultimo.txt', delimiter=',')
```

En este código, `'pishare'` es el nombre de la carpeta compartida, `'ultimo.txt'` es el archivo temporal creado en el computador con la copia de `'ultimo_dato.txt'`. El comando `np.genfromtxt('ultimo.txt', delimiter=',')` crea un arreglo de Numpy con el último dato. Este proceso está dentro de un ciclo que se repite cada segundo, y actualiza la interfaz con los nuevos datos.

Por otra parte, se crea un segundo diálogo el cual sirve para que el usuario ingrese las características del reporte que desea generar. El primer tipo de reporte es sobre datos existentes, así que el usuario puede ingresar el intervalo de fechas sobre el cual quiere generar el reporte, así como el intervalo de tiempos para generar el reporte. El segundo tipo de reporte es sobre datos nuevos, de modo que se puede elegir el tiempo sobre el cual se va a generar el reporte, así como el intervalo de tiempo entre dato y dato. Los diálogos generados se muestran en las figuras 4.9 y 4.10. En ambos casos se permite al usuario elegir la ruta en la cual quedará el archivo.

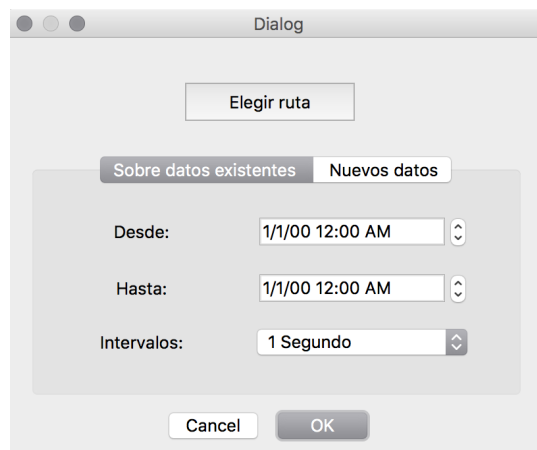


Figure 4.9: Diálogo de adquisición de datos históricos

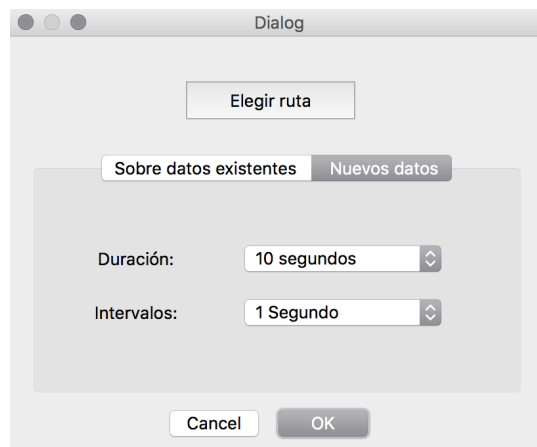


Figure 4.10: Diálogo de adquisición de datos nuevos

RESULTADOS

Tras completar el montaje del prototipo, el servidor y la interfaz se realizaron diferentes pruebas de forma exitosa. Inicialmente se realizó una prueba de calibración, en donde se hizo un barrido de 40 a 400mA, para obtener la relación entre el valor de la corriente y el voltaje digital que sale del conversor análogo digital. Posteriormente se inyectaron al sistema señales triangulares y cuadradas para notar la formación de armónicos. Se muestra también el funcionamiento de la interfaz, y el servidor. En la figura 5.1, se muestra el montaje en funcionamiento.

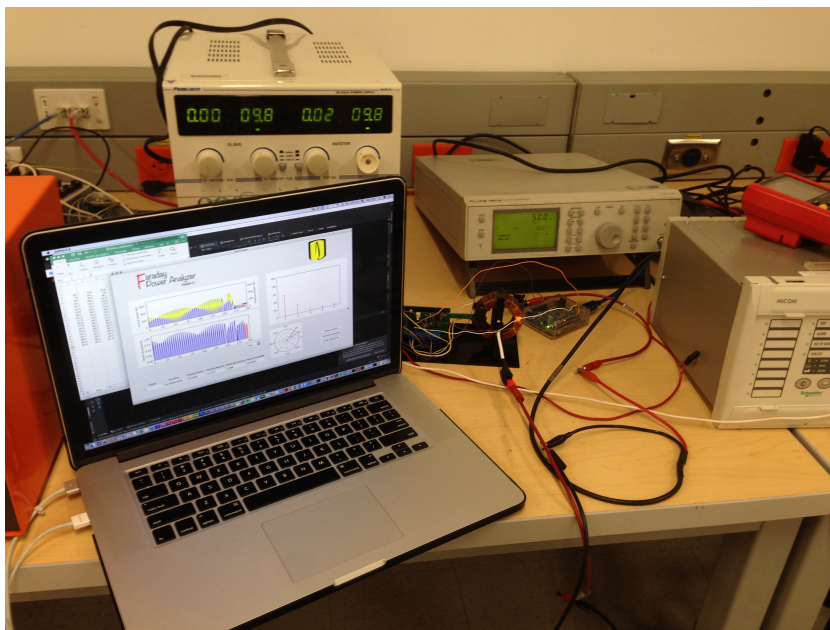


Figure 5.1: Imagen del montaje completo con el cual se realizaron las pruebas

5.1 Funcionamiento de la interfaz

La interfaz con sus diferentes elementos se puede observar en la figura 5.2. Además, en la figura 5.3 se puede observar el funcionamiento de la gráfica de la interfaz mostrando la medida de potencia activa, reactiva y factor de potencia actual e histórico. Hay que tener en cuenta que dado que sólo se midió corriente, el voltaje se asumió como 1V. Además el factor de potencia mostrado *no tiene interpretación física*. El valor mostrado corresponde al coseno de la fase de la corriente, pero para poder tener un factor de potencia verdadero sería necesario conocer la fase del voltaje. Se realizó el proceso de esta forma para que el prototipo sea fácilmente extensible a medir voltaje.

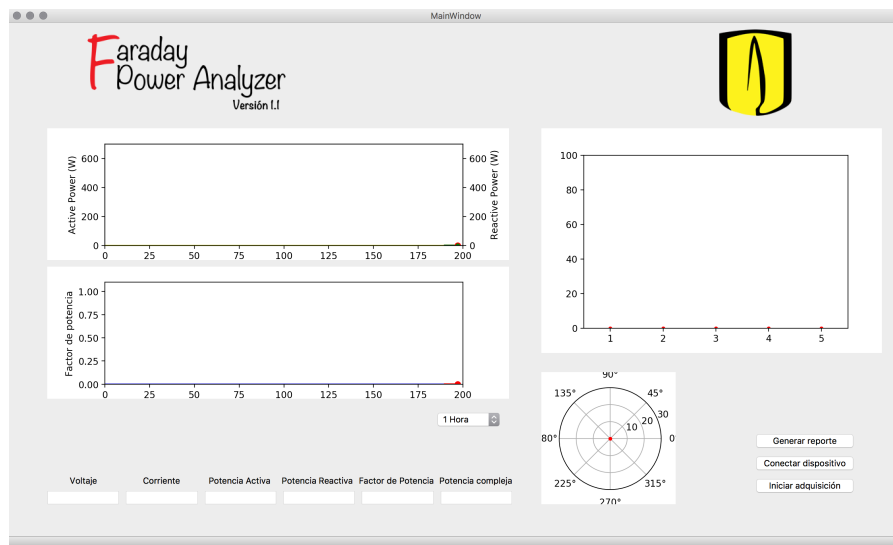


Figure 5.2: Interfaz gráfica completa

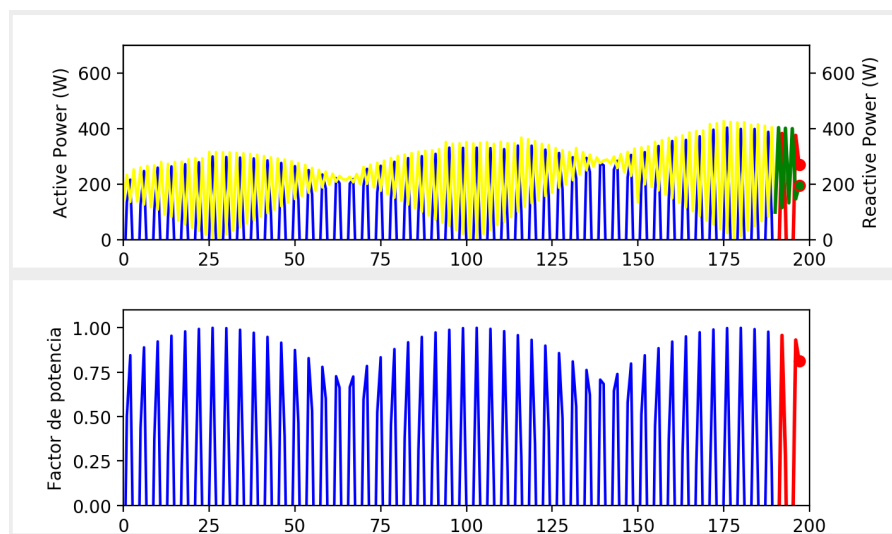


Figure 5.3: Funcionamiento de las gráficas de potencia y factor de potencia

5.2 Funcionamiento del servidor

Para mostrar el correcto funcionamiento del servidor, se muestra un fragmento de 10 segundos correspondiente al archivo histórico a continuación.

```

1 2018-05-14 07:38:22.3251,1,0.232,316.234,20.019,25.811,5.047,4.091,
2 2018-05-14 07:38:23.3734,1,1.413,333.407,4.169,15.563,2.815,2.887,
3 2018-05-14 07:38:24.4262,1,3.026,314.870,20.392,26.229,4.684,4.782,
4 2018-05-14 07:38:25.4789,1,1.622,333.638,5.512,16.440,1.350,0.559,
5 2018-05-14 07:38:26.5309,1,0.003,315.327,20.898,26.223,4.082,4.621,
6 2018-05-14 07:38:27.5844,1,1.627,334.101,4.339,16.779,1.165,0.964,
7 2018-05-14 07:38:28.6331,1,3.021,314.809,20.714,25.862,4.326,4.067,
8 2018-05-14 07:38:29.6855,1,1.408,333.167,5.869,15.623,3.017,2.734,
9 2018-05-14 07:38:30.7412,1,0.234,316.364,20.280,25.284,5.462,4.461,
10 2018-05-14 07:38:31.7905,1,1.841,332.108,5.883,14.426,4.299,4.070,

```

En el fragmento se observa que cada 1 segundo se almacena un nuevo dato. Dado que no se está realizando mediciones de voltaje, el dato de voltaje está fijo en 1. Existe un retraso de aproximadamente 50 milisegundos entre dato y dato, debido al procesamiento del bloque.

5.3 Datos de calibración

Los datos obtenidos se presentan en la tabla 5.2. Se muestra además la desviación estándar y la incertidumbre porcentual. Además se muestra una gráfica de los datos en la figura 5.4. Los datos tomados tuvieron una duración de 10 segundos. Es decir que se realizó la medición sobre 10 bloques de datos.

Corriente(mA)	Voltaje digital	Desviación	Incertidumbre (%)
40	40.55	1.82	4.48
60	60.54	4.59	7.58
80	83.58	1.79	2.15
100	104.10	1.32	1.26
120	124.50	3.02	2.42
140	142.78	3.88	2.71
160	164.74	4.05	2.46
180	183.5	4.42	2.41
200	203.81	2.68	1.32
220	221.56	5.12	2.31
240	243.37	5.54	2.28

260	267.36	2.96	1.11
280	284.94	7.01	2.46
300	304.13	3.14	1.03
320	327.31	5.17	1.58
340	342.92	10.04	2.93
360	369.12	9.62	2.61
380	389.78	6.93	1.78
400	411.62	9.54	2.32

Table 5.1: Datos de calibración

Se muestra una incertidumbre promedio de 2,48% en los datos. La relación encontrada entre la corriente y el voltaje digital esta dada por,

$$V_d = 1.02 \times 10^3 I + 2.68 \times 10^{-1}, \quad (5.1)$$

usando la corriente en Amperios, mostrando no solo una gran precisión debido a la baja incertidumbre sino que también una alta exactitud debido al casi nulo desplazamiento del cero.

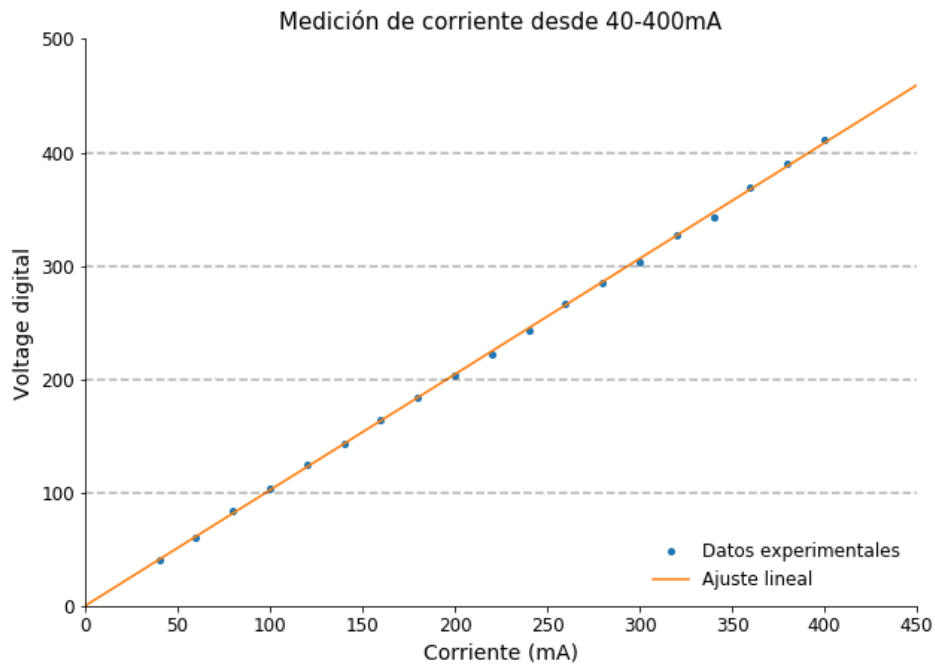


Figure 5.4: Datos de calibración entre 40mA y 400mA

5.4 Inyección de señal triangular

Se realiza una prueba inyectando una señal triangular de 400mA pico-pico y se observa la señal obtenida por el sistema. Se realiza también una FFT de la misma con el objetivo de analizar el espectro de frecuencia. Los resultados se muestran en las figuras 5.5 y 5.6 respectivamente [9].

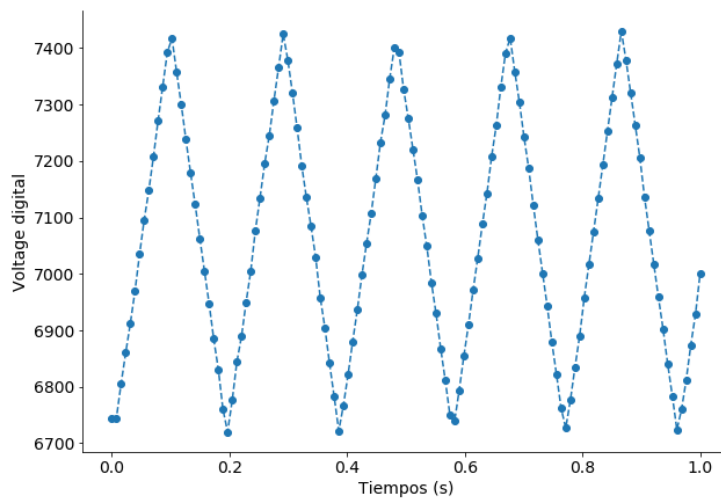


Figure 5.5: Señal triangular medida por el sistema

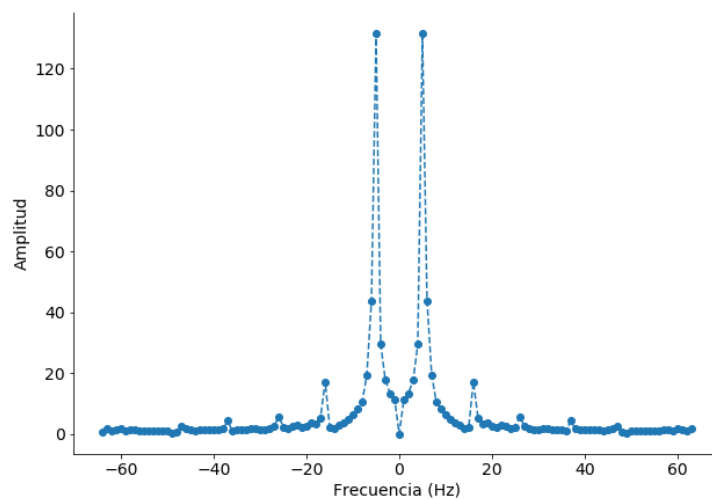


Figure 5.6: Espectro de la señal triangular medida por el sistema

5.5 Generación de armónicos

Se prueba ahora la posibilidad de medir armónicos en la corriente usando el sensor. Para esto se inyecta corriente usando una señal seno, una señal sierra y una señal cuadrada. Los resultados son mostrados en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

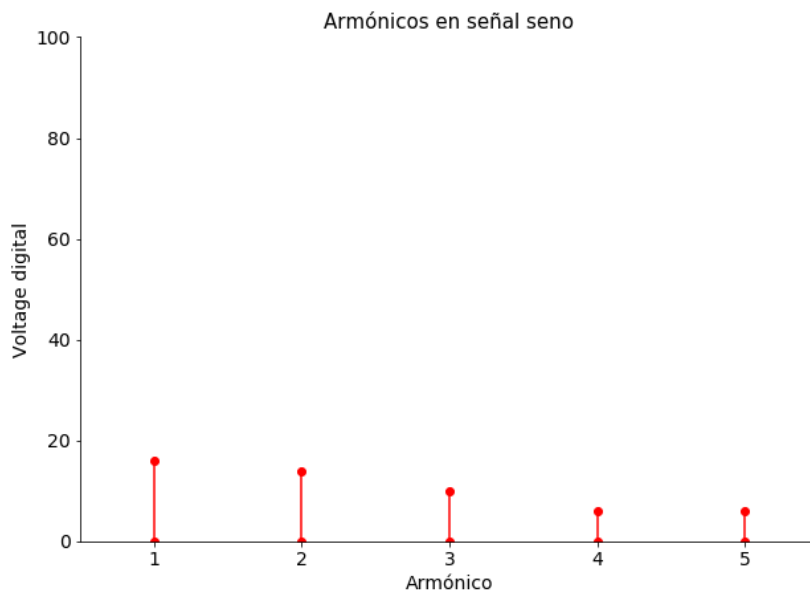


Figure 5.7: Armónicos de una señal sinusoidal

En la figura 5.7 se observa que ningún armónico sobresale particularmente. Los valores mostrados en la gráfica básicamente corresponden a ruido.

Ahora bien, al generar una señal sierra se observa como los tres primeros armónicos sobresalen. Esto se debe a que la expansión de una señal sierra en serie de Fourier está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{T}\right), \quad (5.2)$$

de modo que tanto los armónicos pares como impares sobreviven y decaen como $1/n$, tal como se muestra en la gráfica [10].

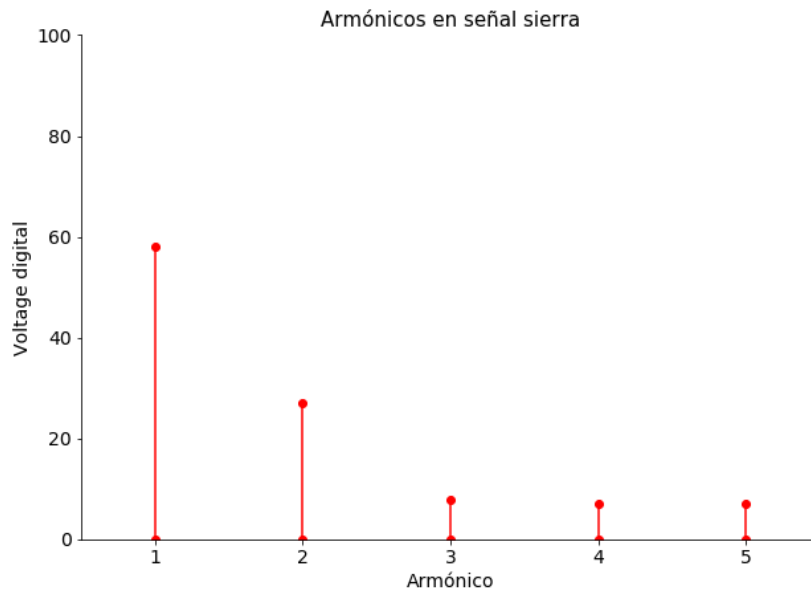


Figure 5.8: Armónicos de una señal sierra

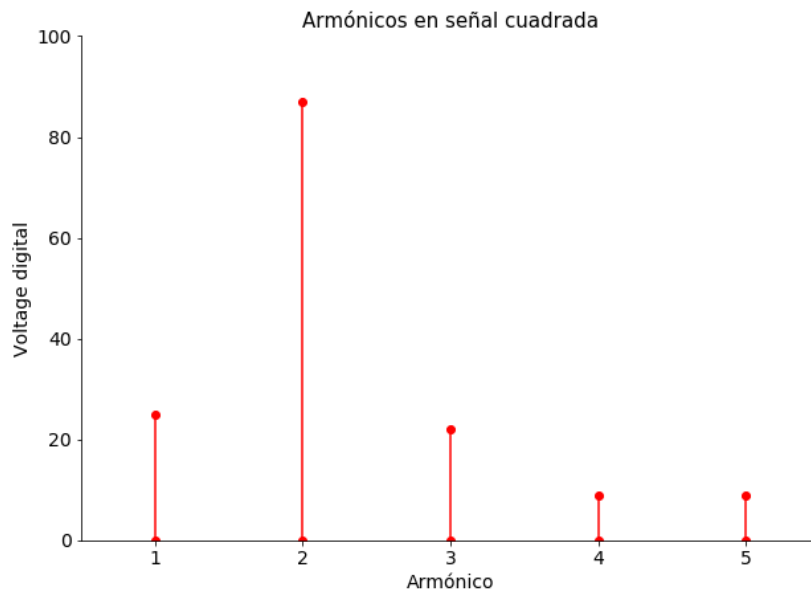


Figure 5.9: Armónicos de una señal cuadrada

Al inyectar una señal cuadrada, se observa en la figura 5.9 que el segundo armónico sobresale fuertemente. Esto se debe a que la expansión en series de Fourier de una señal cuadrada está

dada por,

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{T}\right), \quad (5.3)$$

de modo que únicamente sobreviven los valores de n impar. Dado que se está tomando la señal fundamental como el armónico cero, en este caso sobreviven los armónicos pares, tal como se observa en la figura [11].

5.6 Costos

Dado que los sensores GMR se plantean como una opción de bajo costo frente a otras opciones de alta precisión como lo son los transformadores ópticos, es necesario saber cuánto podría costar producir un dispositivo de éstos en masa. Se realizarán los cálculos usando los mismos materiales usados en éste prototipo.

Pieza	Referencia	Costo unitario (\$)
Sensor GMR	NVE AA002-02E	4.54
Amplificador de instrumentación	INA114	5.28
Amplificador campo DC	TI OPA552	2.02
ADC	ADS1115	2.69
Otros (PCB, etc)	N/A	5

Table 5.2: Costos de los elementos

Además de esto estarían los costos de la Raspberry Pi y el arduino. Para poder producir un equipo más robusto, sería necesario usar un microcontrolador en vez del arduino y cambiar el ADC a uno que pueda muestrear más rápido. Se cambiaría también la Raspberry Pi, a una versión más simple (la versión "zero" por ejemplo que cuesta alrededor de 5 dólares) o a un procesador de señales digitales. De este modo es posible construir un medidor de potencia funcional por un costo de entre 30 y 35 dólares.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En éste proyecto se puso en evidencia como se puede usar el efecto GMR para realizar mediciones en sistemas eléctricos. Se diseñó un prototipo capaz de medir corrientes desde los miliamperios hasta los 10 Amperios, para una señal a 5Hz. También usando una Raspberry Pi se armó un sistema de procesamiento de señales digitales el cual tomaba bloques de 1 segundo, y se obtenía el fasor de corriente y la amplitud de los primeros cinco armónicos de la señal de corriente. Además de esto, la Raspberry Pi funcionó también como servidor en dónde por una parte se almacenan los datos obtenidos por el sensor, y por otra parte se comunicaban estos datos con un cliente. Finalmente el cliente consistió de una interfaz gráfica que cada segundo se actualizaba con los últimos datos procesados, pudiendo así monitorear la corriente de forma casi instantánea.

Para mostrar el correcto funcionamiento del sistema, se hacen diferentes pruebas. La primera consiste en hacer un barrido sobre la corriente, de 40mA hasta 400mA, tomando datos cada 5mA. En esta prueba se encontró una relación lineal como se esperaba con una incertidumbre promedio de 2,48%. Cabe resaltar que se espera realizar aplicaciones donde la corriente medida sea mayor que 1A, de modo que los valores medidos estén en el nivel del ruido, mostrando la alta precisión con la cual se logró medir. Posteriormente se realizó una prueba de generación de armónicos. En ésta se inyectaron diferentes señales seno, sierra y cuadrada y se obtuvieron los valores de los armónicos mostrando el posible uso de el efecto GMR en la medición de armónicos. Todas estas pruebas se realizaron desde la interfaz, conectada remotamente.

La versatilidad mostrada por el sistema muestra que existen diversas aplicaciones para el prototipo construido. Por ejemplo, se puede implementar el mismo en sistemas trifásicos y ser usado para detección de fallas. En éste caso lo único que habría que cambiar es el sensor a uno

con menor sensibilidad pero mayor rango de operación, como lo es el AAK001. El sistema también puede ser usado para medición inteligente ya sea en el sector residencial, comercial o industrial. También en el sector industrial puede ser usado junto con la interfaz como sistema de monitoreo. Finalmente dado que el sistema sirve para mediciones en sistemas AC y DC, con un amplio rango de frecuencia y corriente de operación, su uso en redes inteligentes y microrredes puede ser una gran alternativa.

Por último, para poder crear un prototipo completamente funcional, los siguientes aspectos deben ser mejorados. Primero, actualmente el prototipo funciona con dos fuentes de voltaje externas. Éstas deben ser reemplazadas por una fuente única que se pueda conectar a 110V. Segundo, se debe implementar la medición de voltaje para poder así tener una medición real de la potencia y del factor de potencia. Se debe cambiar el ADC a uno que sea capaz de muestrear a una mayor velocidad de muestreo de modo que sea posible medir señales de mayor frecuencia con sus respectivos armónicos. También sería importante reemplazar el Arduino por un microcontrolador de mayor velocidad. En cuanto a la interfaz gráfica sería ideal poder conectar diferentes dispositivos al mismo tiempo con el propósito de poder implementar mediciones de control o lógicas de fallas. Finalmente en cuanto al servidor, debería manejarse un formato más global como SQL, además de aumentar la capacidad de almacenamiento.

REFERENCIAS

- [1] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F.N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, G. Chazelas, *Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices*. Phys. Rev. Lett. 1988, 61, 2472–2475.
- [2] Y. Ouyang, J. He, J. Hu, S. X. Wang *A Current Sensor Based on the Giant Magnetoresistance Effect: Design and Potential Smart Grid Applications* Sensors, vol. 12, 2012.
- [3] D.J. Griffiths *Introduction to electrodynamics* Tercera edición, Prentice Hall
- [4] A.R. Bergen, V. Vittal *Power Systems Analysis* Segunda Edición, Cap. 2 Prentice Hall
- [5] Datasheet, *AA/AB-Series Analog Magnetic Sensors*, NVE Corporation
- [6] Datasheet, *OPA55x High-Voltage, High-Current Operational Amplifiers*, Texas Instruments
- [7] Datasheet, *INA114 Precision Instrumentation Amplifier*, BURR-Brown
- [8] Datasheet, *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator* Texas Instruments
- [9] Weisstein, Eric W. *Fourier Series–Triangle Wave*. MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesTriangleWave.html>
- [10] Weisstein, Eric W. *Fourier Series–Sawtooth Wave*. MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSawtoothWave.html>
- [11] Weisstein, Eric W. *Fourier Series–Square Wave*. MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html>

